

INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA NO-LINEAL EN EL MODELADO DE TORRES EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL ANTE CARGA SÍSMICA

SOIL-FLUID-STRUCTURE INTERACTION MODELLING IN LARGE HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINE UNDER SEISMIC LOADS

Diego F. Turello^{a,b,c}, Mauro S. Maza^a, Sergio Preidikman^{a,b}, Fernando G. Flores^{a,b} y
Federico Pinto^{a,b}

^a*Depto. Estructuras FCFyN UNC, 5000 Córdoba, Argentina. diego.turello@unc.edu.ar*

^b*IDIT – UNC-CONICET, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina*

^c*GIMNI – UTN-FRSF, Lavaisse 610, 3000 Santa Fe, Argentina.*

Palabras clave: Interacción suelo-estructura, Interacción fluido-estructura, Aeroelasticidad computacional, Energía eólica, Turbina eólica.

Resumen. En los últimos años, la tendencia en el diseño de aerogeneradores de eje horizontal ha sido la de incrementar su tamaño para conseguir aumentar la energía extraída del recurso eólico. Ante un evento sísmico existen incertidumbres sobre el desempeño de las estructuras de fundación, ya que las mismas se diseñan en general para cargas de uso normal y frente a las sollicitaciones cíclicas que induce el sismo, la rigidez del suelo se degrada fuertemente inclusive para pequeñas deformaciones lo que genera que la respuesta sea no-lineal inclusive para puntos del suelo lejos de la falla. El interés de este trabajo es explorar las consecuencias de la introducción de fenómenos de interacción suelo-estructura en la respuesta de este tipo de aerogeneradores, analizando especialmente el desempeño de las estructuras de fundación ante la excitación sísmica considerando la no-linealidad en la respuesta del suelo. En este trabajo se modelan las fundaciones de las torres eólicas a través de modelos discretos calibrados con modelos más complejos de la fundación.

Interacción Suelo-Fluido-Estructura en el Análisis de Grandes Turbinas Eólicas de Eje Horizontal Bajo Sollicitaciones Sísmicas. Soil-Fluid-Structure interaction in the seismic analysis of large horizontal axis wind turbine

Keywords: Fluid-structure interaction, Soil-structure interaction, Computational aeroelasticity, Wind energy, Wind turbine.

Abstract. Lately, the current trend in wind turbine analysis and design is to make bigger turbine in order to maximize the energy extracted from the wind. Facing a seismic event, there are many uncertainties concerning the foundations because they are generally designed to withstands normal loads. In a seismic load case, the soil stiffness is weaken even for small strains which leads to a non-linear behavior even though the point is far away from failure. In this contribution, the consequences of introducing non-linear soil-structure interaction on the mechanical model and the performance of the complete structure are investigated.

1. INTRODUCCIÓN

El modelado de turbinas eólicas de eje horizontal y de gran tamaño (LHAWT por su sigla en Inglés) es un tema muy actual y relevante que involucra la interacción de tres medios: i) el fluido aire, ii) la estructura de la turbina y iii) el medio sólido (suelo) donde se fundan estas estructuras. Existe incertidumbre sobre el desempeño de estas estructuras cuando son sometidas a sismo. Por este motivo, es necesario incorporar en las verificaciones estructurales la respuesta sísmica de las turbinas eólicas, teniendo en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura que se desarrollan en las fundaciones de estas torres y que afectan la respuesta general del sistema completo.

En este trabajo, el análisis se realiza en el dominio del tiempo debido a las no-linealidades presentes en el problema, tanto en la parte aeroelástica como en la de interacción suelo-estructura. El problema aeroelástico se aborda con un enfoque de co-simulación, vinculando dos herramientas computacionales independientes: i) LHAWT/AC (ver Gebhardt (2012)) la cual es una implementación del Método de Red de Vórtices Inestacionario (UVLM) (Preidikman (1998)) desarrollada para simular aerodinámicamente turbinas eólicas de eje horizontal de tres palas y ii) Simpack (ver Flores (2011)) el cual es un programa de simulación dinámica estructural basada en el Método de Elementos Finitos que admite no linealidades geométricas y materiales.

Las cargas aerodinámicas no-conservativas calculadas con LHAWT/AC se aplican sobre el modelo estructural de Simpack, del cual a su vez se obtienen posiciones y velocidades que intervienen en las condiciones de borde del problema aerodinámico. El acoplamiento se realiza por medio de un esquema de interacción débil desarrollado específicamente para este tipo de problemas como el planteado por Maza et al. (2014). La herramienta computacional resultante permite realizar simulaciones en el dominio del tiempo con integración explícita de las ecuaciones de movimiento, y es capaz de representar el comportamiento aeroelástico no-lineal e inestacionario con un costo computacional moderado a bajo.

Las fundaciones de las turbinas eólicas de grandes dimensiones pueden ser de diversas tipologías, i.e. zapatas aisladas circulares, zapatas ancladas, mono-pilotes, grupo de pilotes, dependiendo su elección de múltiples factores, entre los que se encuentran: el tamaño de la turbina, las cargas a transmitir al suelo, las propiedades mecánicas del suelo de fundación, la estructuración del perfil de suelo en la zona de fundación, etc.

El uso de la zapata aislada circular es una práctica común en este tipo de casos, por ello es la tipología que se adopta como caso de estudio en este trabajo (Svensson (2010)).

La interacción suelo-estructura (ISE) depende fuertemente de la tipología de la fundación y las propiedades mecánicas de los medios intervinientes. Como una primera aproximación a modelar esta interacción, se propone el uso de modelos concentrados standard resorte-amortiguador para estimar la rigidez estática y dinámica del sistema suelo-fundación. Además se considera una masa agregada a la de la fundación que es la masa de suelo que se mueve solidaria a la fundación. Al considerar estos modelos concentrados es necesario introducir los amortiguadores o disipadores viscosos para modelar la radiación de energía que se da en el medio suelo al considerarlo como un medio semi-infinito.

En contribuciones anteriores ya se ha estudiado el efecto de introducir estos modelos concentrados en el modelo estructural de la turbina eólica, siendo el interés en este caso estudiar los efectos de las no-linealidades materiales en el suelo a la hora de caracterizar la rigidez y el amortiguamiento de estos modelos concentrados. Sin duda que el objetivo de la línea de trabajo es modelar de forma acoplada el problema de interacción suelo estructura junto al problema aero-elástico y en ese sentido es que se enfocan los esfuerzos del grupo de investigación.

2. MODELO ESTRUCTURAL ANALIZADO

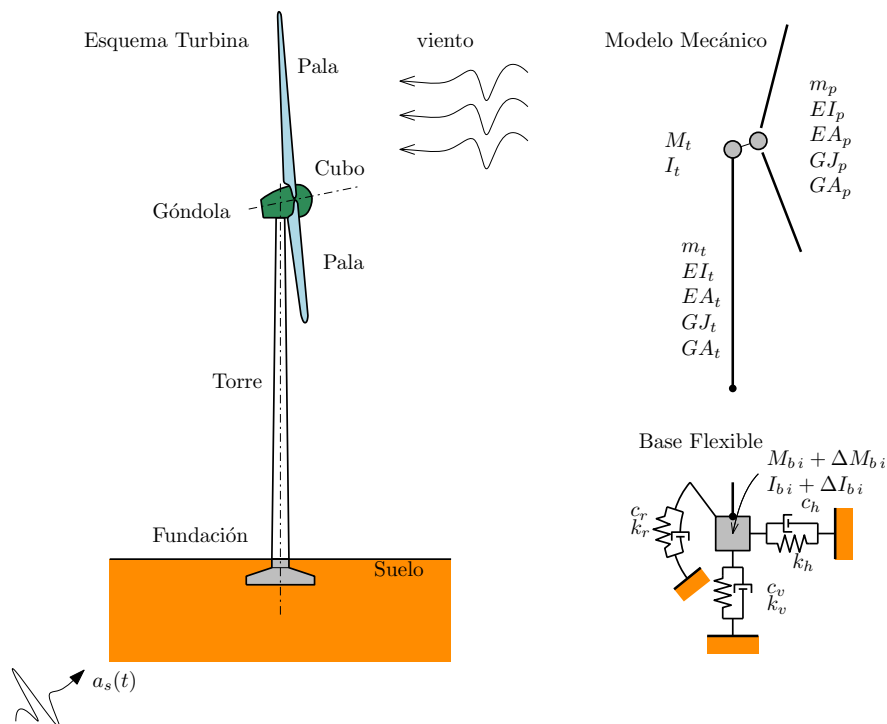


Figura 1: Esquema de la turbina y el modelo mecánico analizado.

En este trabajo se analiza un modelo estructural de la turbina eólica que tiene en cuenta la flexibilidad y masa distribuida de las palas, los cuerpos rígidos del cubo y la góndola, la torre flexible y la fundación idealizada como un cuerpo rígido sustentado mediante elementos discretos que modelan la interacción suelo estructura en el sentido vertical, horizontal, rotacional y torsional. Un esquema de este modelo se muestra en la Figura 1.

Las palas están compuestas por los modelos snl-100 del Sandia National Laboratories, con 100 m de longitud y cuyas propiedades mecánicas se pueden ver en la publicación de Griffith (2013). La masa de cada una de las palas es de $m_p = 1,12 \times 10^5$ kg. Estos elementos estructurales se modelan como elementos de vigas con masa y rigidez variables en la longitud. Además en este modelo existen giros relativos entre el cubo y la góndola lo que permite modelar la situación de la turbina con las palas girando. El ángulo de ataque de las palas es una variable de entrada del problema y en este caso no se controla durante la simulación.

La torre está constituida por una sección transversal anular de acero, con diámetro exterior variable entre $d_{et} = 10,87$ m a 6,13 m y espesor variable entre $t_t = 0,0347$ m a 0,0253 m, para las secciones de la base de la torre y la sección superior, respectivamente. El material adoptado para la torre tiene propiedades mecánicas: $E_t = 2,1 \times 10^2$ GPa, $\nu_t = 0,3$, $\rho_t = 7850$ kg/m³. La altura de la torre hasta la góndola es de $H = 135$ m.

La masa de la góndola, el cubo y las vigas de unión suman $M_g + M_c = 14,07 \times 10^5$ kg.

Tanto para las palas como para la torre se adoptan elementos finitos de viga 3D con una formulación de tipo Geométricamente Exacta (GEBT) (Simo (1985), Simo y Vu-Quoc (1986)).

Para considerar la base flexible, el nudo inferior de la torre está vinculado al medio suelo a través de elementos *spot* en Simpack, que proporcionan tanto la rigidez elástica como la disipación viscosa en las direcciones consideradas. Además en este nudo se coloca la masa de la

fundación más la contribución de la masa agregada del suelo al moverse solidaria a la base. Un esquema de estos modelos se muestra en la Figura 1 (por cuestiones de claridad en la figura no fueron incluidos todos los pares resorte-amortiguador).

3. MODELO DE LA FUNDACIÓN

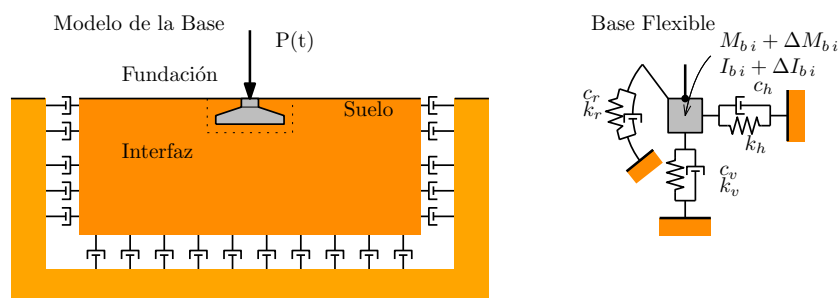


Figura 2: Esquema del modelo mecánico de la base de fundación.

En este trabajo se genera un modelo en PLAXIS 3D (Brinkgreve et al. (2016)) para calibrar los parámetros de rigidez y disipación no-lineales de los elementos discretos incorporados en el modelo estructural para modelar la base flexible. Ver la Figura 2. En este caso se considera una zapata aislada con un diámetro $D_b = 20,00\text{m}$ (Maunu (2008), Svensson (2010)) apoyada sobre el suelo, el cual está compuesto por arena suelta a media con velocidades de propagación de ondas de corte que van de $V_s = 200\text{ m/s}$ y $V_s = 400\text{ m/s}$, respectivamente. Se adopta para el suelo el modelo constitutivo *Hardening Soil Model with Small Strains* (HS-SM Benz et al. (2009)) el cual modela la degradación de rigidez a bajas deformaciones y es útil para modelar carga cíclica como la sísmica. Los parámetros adoptados para el suelo se muestran en la 1.

En los bordes del dominio de suelo se consideran bordes absorbentes para modelar la pérdida de energía por radiación de ondas fuera del dominio de análisis. Además se considera amortiguamiento de Rayleigh en el suelo con $\xi = 0,05$ para las frecuencias de 1 Hz y 10 Hz.

La zapata se modela como un sólido elástico con los siguientes parámetros: $E_h = 23500\text{ MPa}$, $\nu_h = 0,17$, $\gamma_h = 25\text{ kN/m}^3$.

Sobre la frontera entre la zapata y el suelo se considera un interfaz no-lineal que modela la interacción entre ambos dominios sólidos.

Se modelan dos escenarios, el primero con una carga estática sobre la zapata para calcular la rigidez equivalente del modelo concentrado (ya sea el modo de carga: vertical, horizontal, flector o torsor) y el segundo con una carga armónica para estimar la disipación del modelo y calibrar un coeficiente de disipación viscosa (también para cada modo de carga y variando la frecuencia de la carga hasta encontrar resonancia en el sistema).

En la Figura 4 se muestran los coeficientes de rigidez estática de las fundaciones en función de la velocidad de propagación de ondas de corte del suelo V_s y el diámetro de la base D_b . Puede verse que la rigidez del modelo concentrado varían sensiblemente con la rigidez del suelo. En la Figura 3 se puede ver la malla utilizada en el modelo de PLAXIS 3D y la deformada para el caso de carga vertical F_z estática.

En la Figura 5 se muestran los coeficientes de disipación C en función del modo (vertical, horizontal, flector o torsor) y la rigidez del suelo. Puede verse que la variación es menor que en el caso de la rigidez estática.

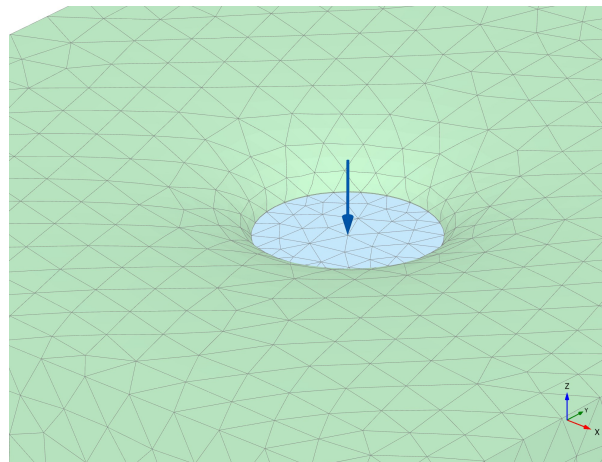


Figura 3: Malla en el modelo de Plaxis para calcular los coeficientes de rigidez estática y de disipación. Deformada para el caso de carga estática vertical (F_z).

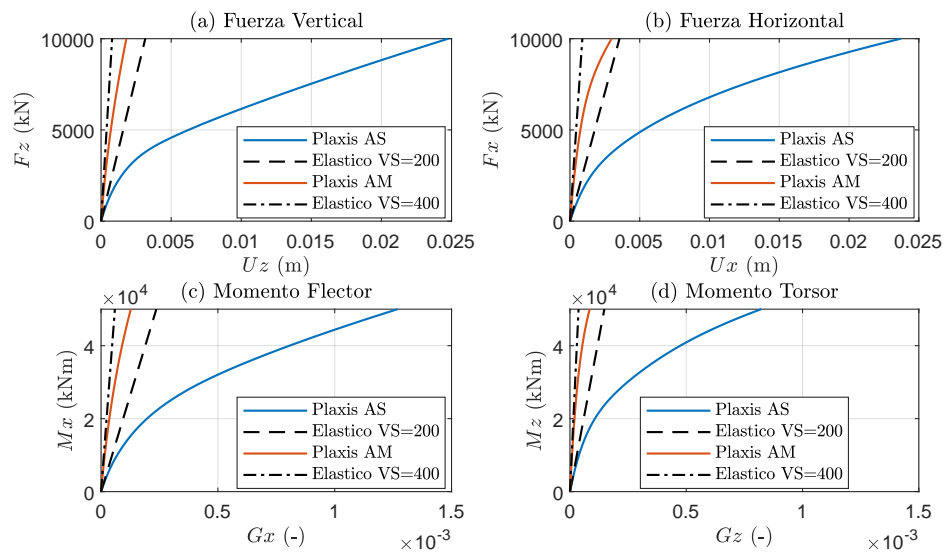


Figura 4: Variación de la rigidez estática de las fundaciones en función de V_s para: (a) Coeficientes de rigidez vertical K_v , (b) lateral K_h , (c) Coeficientes de rigidez al giro de flexión (rocking) K_r y (d) rigidez al giro de torsión K_t .

Parameter	Name	Unit	Arena Suelta	Arena Media
Soil unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	kN/m ³	16	16
Soil unit weight below phreatic level	γ_{sat}	kN/m ³	20	20
Secant stiffness in standard drained triaxial test	$E_{50\text{ref}}$	kN/m ²	7.83E+03	3.13E+04
Tangent stiffness for primary oedometer loading	E_{oedref}	kN/m ²	6.26E+03	2.51E+04
Unloading / reloading stiffness	E_{urref}	kN/m ²	2.35E+04	9.39E+04
Power for stress-level dependency of stiffness	m	-	0.50	0.50
Cohesion	c'	kN/m ²	0.00	0.00
Friction angle	φ'	°	30	32
Dilatancy angle	ψ'	°	0.00	0.00
Shear strain at which $G_s = 0,722 G_0$	$\gamma_{0,7}$	-	1.00E-04	1.00E-04
Shear modulus at very small strains	$G_{0\text{ref}}$	kN/m ²	6.52E+04	2.61E+05
Poisson's ratio	ν'	-	0.20	0.20
Shear wave velocity	V_s	m/s	200	400

Tabla 1: Parámetros materiales considerados para la Arena suelta y media en el modelo Hardening Soil Model with Small Strains.

4. REGISTROS SÍSMICOS A CONSIDERAR

El registro sísmico considerado en este trabajo es el correspondiente a la señal registrada en Loma Prieta, la cual se ajusta a los espectros elásticos de diseño del reglamento [INPRES \(2013\)](#), considerando zonas 4 y 2 para suelos tipo-b y factor de importancia B.

En la Figura 6 se muestran las historias de aceleraciones como fracciones de la aceleración de la gravedad para la señal considerada y en la Figura 7 se muestra el espectro del [INPRES \(2013\)](#) y el correspondiente a la señal ajustada. Se puede ver que las señales ajustan bien a los espectro de diseño salvo en la zona del plafón con menores períodos, lo que se debe a una limitación en el software utilizado para ajustar los acelerogramas. Como la estructura tiene un periodo fundamental que cae fuera del plafón ($T_1 \approx 5,22\text{ s} - 6,77\text{ s}$ para las hipótesis de base fija y base flexible *soft*, respectivamente) se consideró que el ajuste es razonable a los fines del trabajo.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Se muestran a continuación algunos resultados obtenidos de modelar la interacción suelo estructura (SSI por su sigla en inglés) de forma lineal a través de factores de rigidez y disipación constantes y no-lineal utilizando los resultados obtenidos del modelo de PLAXIS 3D. En lo que sigue se denomina a estos dos escenarios como SSI Lineal y SSI No-lineal.

En este caso se considera la turbina eólica sometida a viento en su fase de operación normal que es solicitada por sismo. En la hipótesis $S + V$ (sismo+viento) al considerarse la interacción fluido-estructura en las palas, las cargas aerodinámicas no-conservativas que se producen al vibrar las palas, disipan energía y proporcionan un grado de amortiguamiento importante en dirección x de la góndola.

Se considera la señal de Loma Prieta ajustada al espectro Z4-Sb-B del [INPRES \(2013\)](#) alineada con la dirección del eje de la turbina, excitando principalmente los desplazamientos en x de la torre y las palas.

En la Figura 8 y la Figura 9, se muestran los desplazamientos de la góndola relativos a la base de la torre para los modelos SSI Lineal y SSI No-lineal y las dos rigideces de suelo consideradas, Arena suelta y Arena Media respectivamente. En estas figuras se puede ver que

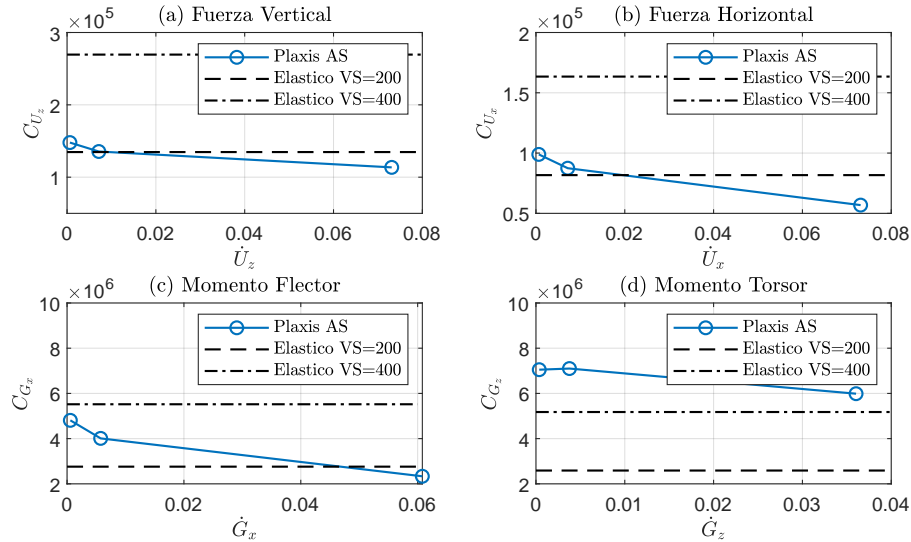


Figura 5: Variación de los coeficientes de disipación en función de la velocidad y de V_s para: (a) Coeficientes en dirección vertical C_{U_z} , (b) en dirección lateral C_{U_x} , (c) Coeficientes asociados al giro de flexión (rocking) C_{G_x} y (d) asociados al giro de torsión C_{G_z} .

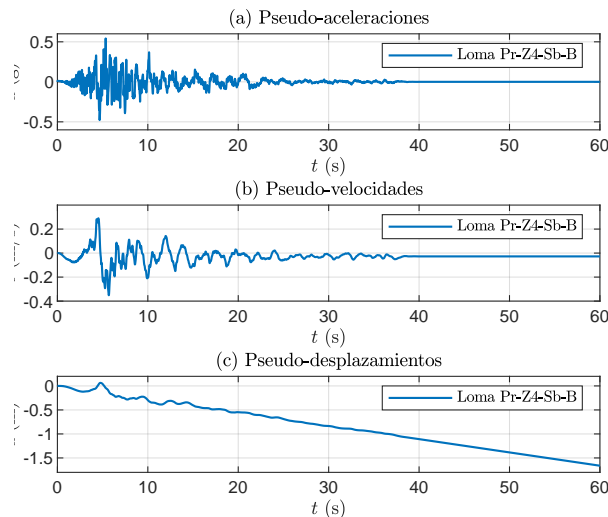


Figura 6: Acelerograma a considerar en el análisis ajustados a los espectros de zona 4 del INPRES (2013).

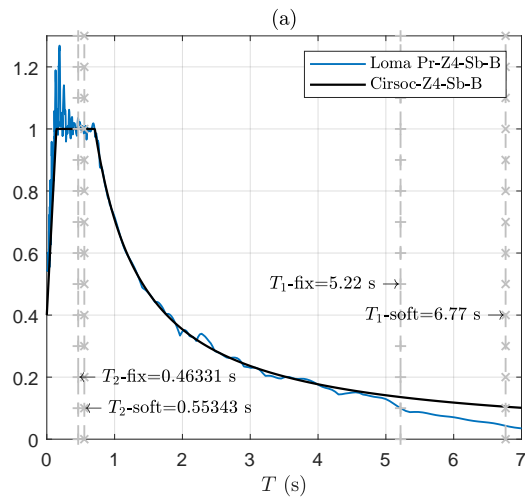


Figura 7: Espectros elásticos de diseño correspondientes a zona 4 del INPRES (2013). Se muestran también los espectros del registro considerado.

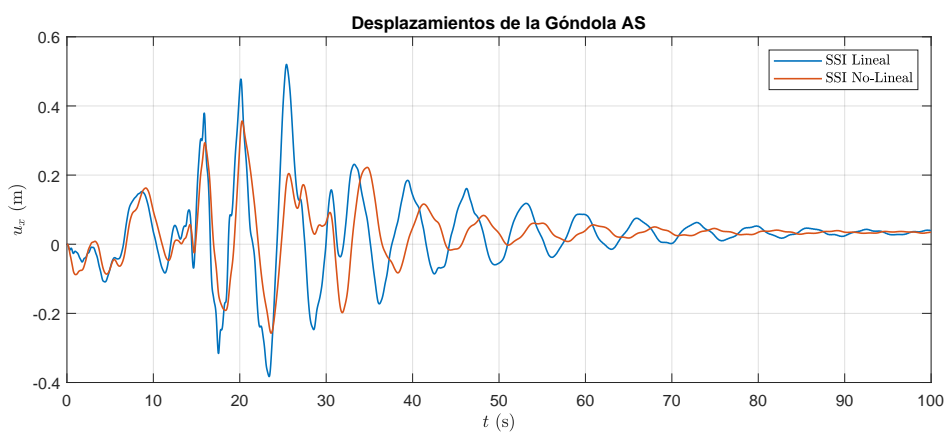


Figura 8: Desplazamientos relativos de la góndola a la base de la torre en dirección x para la SSI Lineal y SSI No-lineal. Arena suelta.

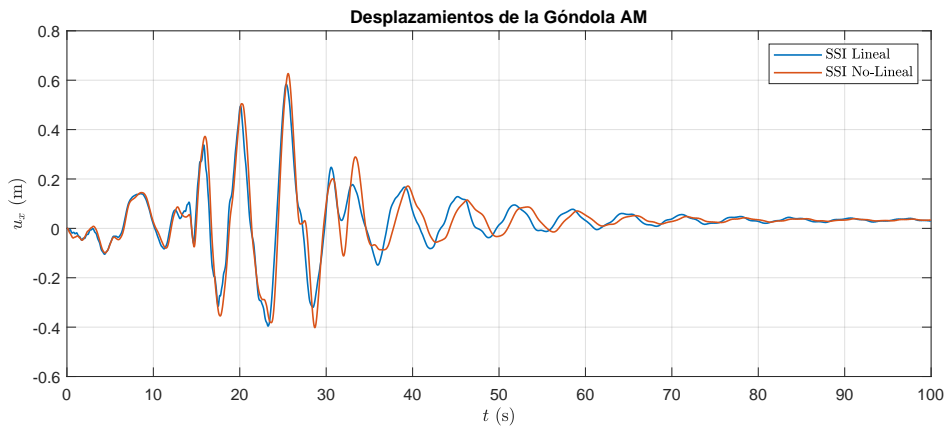


Figura 9: Desplazamientos relativos de la góndola a la base de la torre en dirección x para la SSI Lineal y SSI No-lineal. Arena media.

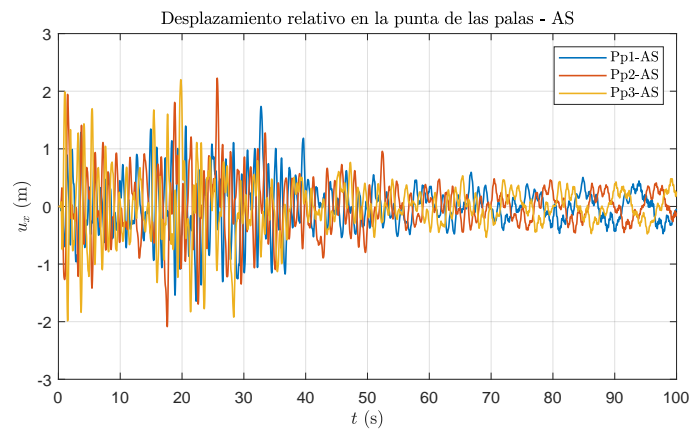


Figura 10: Desplazamientos relativos de la punta de las palas en dirección x entre las hipótesis SSI Lineal y SSI No-lineal.

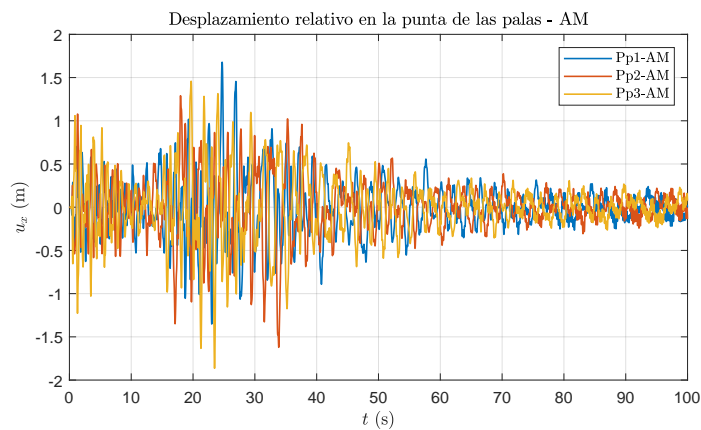


Figura 11: Desplazamientos relativos de la punta de las palas en dirección x entre las hipótesis SSI Lineal y SSI No-lineal.

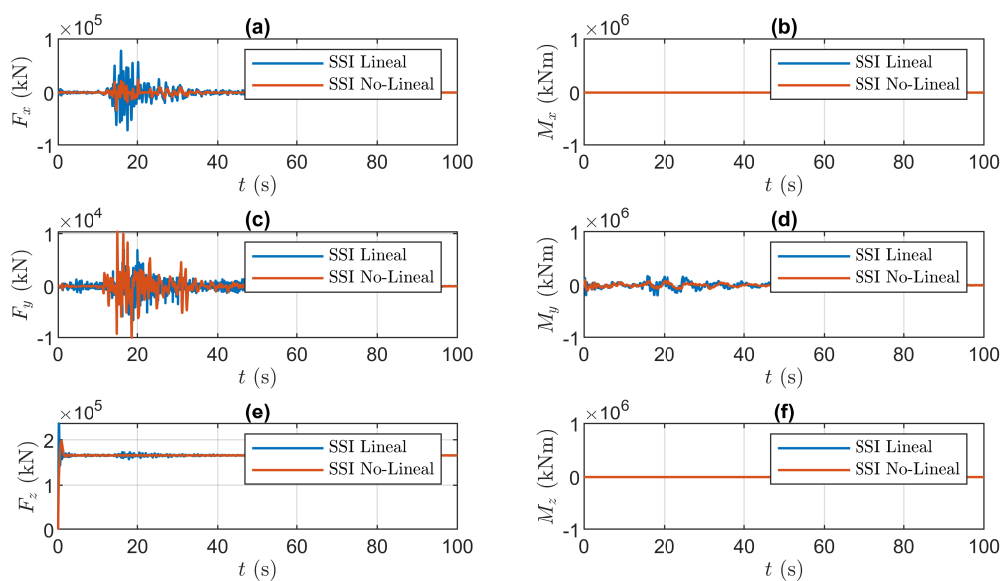


Figura 12: Esfuerzos en la base de la torre: (a) F_x , (b) M_x , (c) F_y , (d) M_y , (e) F_z , (f) M_z . Arena Suelta.

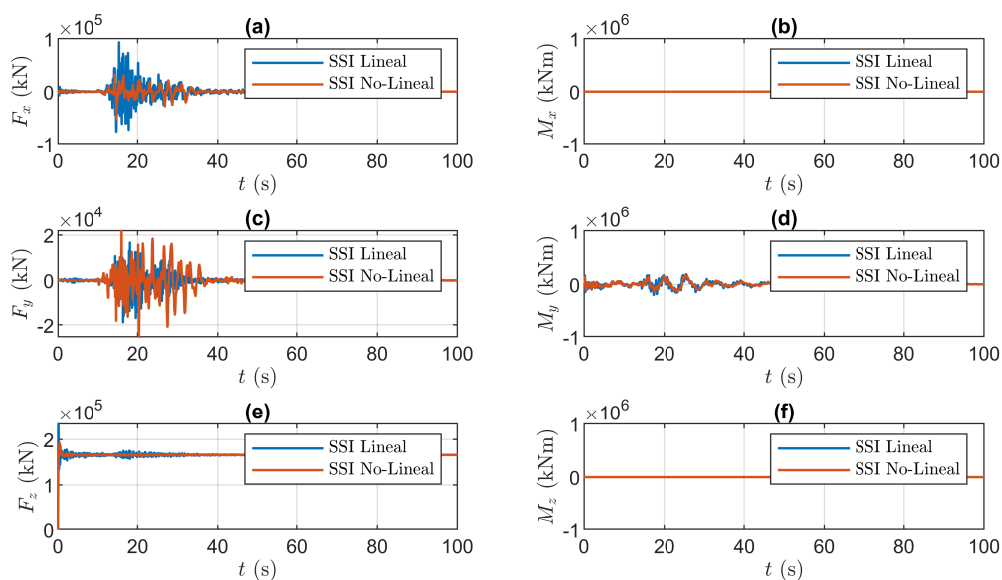


Figura 13: Esfuerzos en la base de la torre: (a) F_x , (b) M_x , (c) F_y , (d) M_y , (e) F_z , (f) M_z . Arena Media.

el desplazamiento máximo en la hipótesis de viento más sismo considerando SSI Lineal es de 0,52 m mientras que en la hipótesis SSI No-lineal es de 0,36 m para el caso de Arena suelta. En el caso de Arena Media estos valores son de 0,58 m para SSI Lineal y de 0,63 m para SSI No-lineal.

En la Figura 10 y la Figura 11 se muestran la diferencia de desplazamientos en dirección x de las puntas de las palas entre las hipótesis de SSI Lineal y SSI No-lineal para los casos de Arena Suelta y Media respectivamente.

Se puede ver que durante la etapa de excitación fuerte del sismo, la diferencia de desplazamiento alcanza valores máximos cercanos a 2,23 m para el caso de Arena Suelta y 1,86 m para el caso de Arena Media. Luego de la fase de excitación severa, el desplazamiento relativo disminuye. Estos valores de desplazamiento relativo no sugieren el riesgo de colisión entre las palas y la torre.

En las Figuras 12 y 13 se muestran los esfuerzos en la base de la torre para los casos de Arena Suelta y Media respectivamente.

En este caso puede verse que las fuerzas en dirección x (dirección del sismo) se excitan durante la fase sísmica siendo los valores mayores para el caso SSI Lineal que para el caso SSI No-lineal. En dirección y las fuerzas son un orden de magnitud menores que en la dirección x y a diferencia del caso anterior las fuerzas son mayores para el caso No-lineal. En dirección z las fuerzas oscilan levemente alrededor de la carga gravitatoria de toda la estructura.

Los momentos M_y asociados a flexión alrededor del eje y dan valores mayores para el caso de interacción lineal que no lineal.

En el caso del suelo más rígido (Arena Media), los esfuerzos son en general mayores a los obtenidos en el caso de Arena Suelta.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se modeló una turbina eólica de grandes dimensiones sometida a sismo. La interacción fluido-estructura se tiene en cuenta a través de un esquema de interacción débil entre un código que calcula las cargas aerodinámicas en las palas y el código estructural que calcula la respuesta mecánica de la estructura. La interacción suelo-estructura se tiene en cuenta a través de modelos discretos standard resorte-amortiguador en cada DOF del punto de vinculación de la estructura con el suelo. A partir de un modelo de Plaxis que tiene en cuenta modelos no lineales para el suelo, se calibraron curvas no lineales para caracterizar la rigidez y la disipación de cada DOF de estos modelos discretos standard resorte-amortiguador. Al considerar la no linealidad en la interacción suelo-estructura, tanto los esfuerzos sobre la base como los desplazamientos de la góndola y las puntas de las palas disminuyen, especialmente para el caso de Arena Suelta. En el caso de Arena Media los desplazamientos crecen al considerar la no-linealidad en la SSI. Al considerar las hipótesis de sismo más viento con la turbina en operación, el sismo excita las palas las cuales vibran respecto a la posición de equilibrio que hubieran tenido si no se manifestaba el sismo, generando una disipación extra de energía en el sistema lo que desacelera el rotor. Los desplazamiento relativo entre la punta de las palas y la torre no sugieren el riesgo de colisión entre las estructuras de las palas y de la torre. La idea de trabajos a futuro es la de modelar en forma acoplada la respuesta del sistema de fundación y el modelo estructural-aerodinámico, para lo cual se está estudiando la posibilidad de vincular directamente Plaxis con Simpack a través de scripts de Python.

REFERENCIAS

- Benz T., Schwab R., y Vermeer P. Small-strain stiffness in geotechnical analyses. *Bautechnik*, 86(S1):16–27, 2009.
- Brinkgreve R., Kumarswamy S., Swolfs W., Waterman D., Chesaru A., Bonnier P., et al. Plaxis 2016. *PLAXIS by, the Netherlands*, 2016.
- Flores F.G. *SIMPACT, An Explicit Finite Element Program*. Departamento de Estructuras, U.N.C., 2011.
- Gebhardt C.G. *Desarrollo de simulaciones numéricas del comportamiento aeroelástico de grandes turbinas eólicas de eje horizontal*. Tesis de Doctorado, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 2012.
- Griffith D.T. The snl100-01 blade: carbon design studies for the sandia 100-meter blade. *Sandia National Laboratories Technical Report, SAND2013-1178*, 2013.
- INPRES C. Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. *Parte I, Construcciones en General*, 2013.
- Maunu P. Design of wind turbine foundation slabs. 2008.
- Maza M.S., Preidikman S., y Flores F.G. Unsteady and non-linear aeroelastic analysis of large horizontal-axis wind turbines. *International journal of hydrogen energy*, 39(16):8813–8820, 2014.
- Preidikman S. *Numerical Simulations of Interactions Among Aerodynamics, Structural Dynamics, and Control Systems*. Tesis de Doctorado, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1998.
- Simo J. y Vu-Quoc L. A three-dimensional finite-strain rod model. part II: computational aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 58:79–116, 1986.
- Simo J.C. A finite strain beam formulation - the three-dimensional dynamic problem. i. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 49:55–70, 1985.
- Svensson H. Design of foundations for wind turbines. 2010.